第40卷 第7期
2023年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 7
Jul. 2023

面向SDGs的塔里木河流域农业灰水足迹分析

杜慧娟[1]， 王光耀[1,2,3]， 冉光妍[1]， 吕 密[1]

（1. 石河子大学理学院，新疆 石河子 832000；2. 石河子大学边疆发展与安全治理研究院，新疆 石河子 832000；
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：塔里木河流域地处西北干旱区是新疆重要的农牧资源交错带，研究该流域农业面源污染对促进流域农业绿色可持续发展具有重要意义。本文在灰水足迹理论的基础上，引入中国可持续发展评价指标，计算2006—2020年塔里木河流域农业灰水足迹、农业灰水足迹强度和农业灰水足迹效率，基于SDGs可持续发展框架分析其时空格局变化特征。结果表明：(1) 2006年以来，塔里木河流域农业灰水足迹整体处于下降趋势，由2006年的6.95×10^{10} m^3（最高值）降至2017年的3.96×10^{10} m^3（最低值），畜牧业灰水足迹在流域农业灰水足迹中年均占比为91.3%，是流域农业灰水足迹的主要来源。喀什地区对流域农业灰水足迹贡献率最高。(2) 塔里木河流域农业灰水足迹强度由2006年的4.48×10^4 $m^3\cdot hm^{-2}$下降至2017年的1.68×10^4 $m^3\cdot hm^{-2}$，下降幅度为62.5%。2012年后，和田地区、喀什地区与克州农业面源污染下降幅度较为明显。(3) 塔里木河流域农业灰水足迹效率由2006年的0.6元$\cdot m^{-3}$上升为2019年4.03元$\cdot m^{-3}$。2012—2020年塔里木河流域农业灰水足迹效率有一定程度的提升，不发达地区数量有所下降。为此，推进农区农牧耦合发展，调整畜禽养殖结构，提高畜禽粪便的资源化是塔里木河流域水环境改善关注的重点。

关键词：农业灰水足迹；农业灰水足迹强度；农业灰水足迹效率；可持续发展目标；塔里木河流域

2015年联合国可持续发展峰会上通过了《2030年可持续发展议程》，该议程从全球层面提出了17项可持续发展目标(Sustainable Development Goals，简称SDGs)与169项具体目标，强调经济、社会与环境的协调发展[1]。可持续发展已经成为指导各国经济社会发展实践的重要指导理论，中国积极落实可持续发展目标并将17项可持续发展目标与国家中长期发展规划有机结合，构建了中国可持续发展评价体系。随着社会经济的快速发展，水资源缺乏、水环境污染等问题都对经济发展、社会稳定以及环境保护产生一定的负面影响。相对于千年发展目标，可持续发展目标更加注重水环境的问题[2]。水和环境卫生的可持续管理SDG6目标已成为国际社会发展的关键目标之一，同时SDGs各指标之间相互关联，诸如SDG2中农业生产发展中所产生的地下水污染与SDG6水和环境目标相关[3]。SDGs指标提出后，众多学者结合SDGs指标从不同角度构建指标体系开展评价，其中水资源相关指标是实现SDGs的重要部分[4]。

Hoekstra和Chapagain等[5]于2008年提出了灰水足迹概念，灰水足迹表示容纳并稀释水体中的水污染物使其达到自然本底浓度或现有的环境水质标准所消耗的淡水体积[6]。灰水足迹的提出使得水污染的评价能够从水量的角度进行考量，进而可以与水资源消费量进行比较[7]。单因子指数评价法、模糊综合评价法、水污染指数法等传统的水污染评价方法，并没有将水污染与稀释水体污染物所需要的淡水量相关联。灰水足迹则将这部分用水量考虑到水污染的评价中，完善了传统的水污染评价方法[8]。

灰水足迹是评价水污染状态的有效手段，正确评价水污染的时空分布特征，不仅关乎生态安全，也关乎社会经济发展。国内外学者围绕灰水足迹展开了大量的研究，研究涉及农业[8-9]与工业[10-12]等领域。目前国内外对农业灰水足迹的研究成果主要集中于灰水足迹的量化与时空演变特征方面[13-15]，

收稿日期：2022-09-29； **修订日期：**2023-02-20
基金项目：石河子大学高层次人才科研启动资金专项(RCSK2018C13)
作者简介：杜慧娟(1999-)，女，硕士研究生，主要从事塔里木河流域人口资源与环境研究. E-mail: 2637729001@qq.com
通讯作者：王光耀. E-mail: wgy010261@yeah.net

而当前国内学者对农业灰水足迹层面的研究多以狭义农业所指的种植业与特定农作物,如玉米、小麦、蔬菜、水果、棉花等[16-19]的灰水足迹核算与评价为主,较少考虑到畜禽养殖业所造成的水污染,导致计算结果有所偏差。灰水足迹的研究范围涉及省域[20]、流域[15]、国家[21]等多个层面。塔里木河流域是典型的干旱区,生态环境脆弱,水资源紧缺,但现有研究对该流域的灰水足迹研究成果较少,也鲜见将农业灰水足迹与SDGs可持续发展指标结合分析。计算流域农业生产活动所造成的灰水足迹,对流域水污染治理、生态恢复以及促进流域农业的绿色可持续发展具有重要意义[15]。因此,本文参照中国可持续发展评价体系的一级指标环境质量中的二级指标氨氮排放量与氮氧化物排放量,考虑到数据的可获得性,将其量化为总氮的排放量,并将畜禽养殖造成的水污染纳入农业灰水足迹的评价体系,从SDGs可持续发展的视角探究塔里木河流域农业灰水足迹的时空分布状况,以期为塔里木河流域农业的可持续发展以及落实水资源保护管理政策提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域位于新疆南部(73°10′~94°5′E,34°55′~43°8′N),是我国最大的内陆河流域,流域范围包括巴音郭楞蒙古自治州(以下简称巴州)、阿克苏地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州(以下简称克州)、喀什地区、和田地区以及新疆生产建设兵团第一师、第二师、第三师、第十四师及若干个团场。流域总面积为102.7×10^4 km^2。塔里木河流域属于典型的大陆性干旱气候,光热资源和土地资源十分丰富,是新疆主要的粮棉基地、畜产品基地和国家级棉基地。同时也是重要的农牧资源交错带,产业结构以农业为主导,其中农业用水量约占流域总用水量的95%[22]。

塔里木河流域在保障南疆地区经济发展,促进自然生态恢复中起着重要作用。由于受到人类活动的多方面影响,使得该流域面临水资源短缺和水污染问题,而农业所造成的内源性污染加剧了流域的水资源紧缺与水污染。通过查阅2006—2020年的《新疆统计年鉴》与《新疆生产建设兵团统计年鉴》可知,2006—2020年塔里木河流域种植业年均氮肥折纯使用量达到4.9×10^5 t,畜牧养殖数量年均达到2.43×10^7头。

1.2 研究方法

1.2.1 农业灰水足迹

(1) 种植业灰水足迹。种植业灰水主要用于稀释化肥农药中的氮、磷、钾营养元素。在农业生产过程中,未被农作物吸收的化肥与农药会随着降雨或者灌溉以淋溶的方式进入地下水或进入地表径流产生水污染。氮肥在化肥施用中所占比例较高,水污染份额最大[21]。因此,在测算种植业灰水足迹时,选取氮肥为评价指标[14-15,23]。由于塔里木河流域位于西北干旱区,降水稀少,农业种植以灌溉为主,不易形成地表径流,氮肥主要造成地下水的污染。每升饮用水中不能超过10 mg的氮,选取氮肥的最大容许浓度0.01 kg·m^{-3}为参考标准[24-25]。基于Hoekstra等的计算方法,推导出种植业灰水足迹计算公式为[6]:

$$WF_{pla-grey}=\frac{\alpha\times Appl}{(C_{max}-C_{nat})} \tag{1}$$

式中:$WF_{pla-grey}$为种植业灰水足迹(m^3);α为氮肥淋溶率(%);$Appl$为氮肥折纯施用量(kg);C_{max}为污染物受纳水体的最大容许浓度(kg·m^{-3});C_{nat}为污染物受纳水体的自然本底浓度(kg·m^{-3})。

(2) 畜牧业灰水足迹。畜牧业灰水足迹主要为畜禽粪污的持久堆放或施入农田后,部分粪污的污染物随着地表径流进入地下水,产生水污染。畜禽粪污的污染物主要为COD(化学需氧量)和TN(总氮)等。查阅相关文献,本研究以TN为关键指标来测量畜牧业灰水足迹[26]。通过查阅相关年鉴选取牛、猪、马、骆驼、骡子、羊、驴为主要考量对象。计算公式为:

$$TN_{bre}=\sum_{i=1}^{7}Num_i\times Day_i\times\left(f_i\times n_i^f\times\beta_i^f+p_i\times n_i^p\times\beta_i^p\right) \tag{2}$$

式中:TN_{bre}为畜禽的氮排放量(t);Num_i为第i种畜禽的存栏量;Day_i为第i种畜禽的养殖天数;f_i和p_i分别表示第i种畜禽的粪便排泄系数和尿液排泄系数(kg·d^{-1});n_i^f和n_i^p分别表示第i种畜禽粪、尿的全氮系数(kg·t^{-1});β_i^f和β_i^p分别表示第i种畜禽粪、尿的流失率(%)。

以TN_{bre}为基础数据测算畜牧业灰水足迹$WF_{ani-grey}$(m^3):

$$WF_{ani-grey}=\frac{TN_{bre}}{C_{max}-C_{nat}} \quad (3)$$

（3）农业灰水足迹（$WF_{agr-grey}$）。农业灰水足迹是种植业灰水足迹与畜牧业灰水足迹的加和：

$$WF_{agr-grey}=WF_{pla-grey}+WF_{ani-grey} \quad (4)$$

1.2.2 农业灰水足迹强度与效率计算

（1）农业灰水足迹强度。反映的是研究区农业水污染的强度，其计算公式为：

$$int=\frac{WF_{agr-grey}}{Land} \quad (5)$$

式中：int 为农业灰水足迹强度（$m^3 \cdot hm^{-2}$）；$Land$ 为耕地面积（hm^2）。

（2）农业灰水足迹效率。反映的是以单位耕地面积水污染为代价所带来的经济效益，其数值越大表示农业发展越强，其数值越小表示农业发展越弱。计算公式为：

$$eff=\frac{GDP_{agr}}{WF_{agr-grey}} \quad (6)$$

公式中：eff 为农业灰水足迹效率（元$\cdot m^{-3}$）；GDP_{agr} 为农业生产总值（元）。

1.2.3 面向SDGs的农业灰水足迹指标 当前许多学者结合SDGs开展了对区域或流域的水土资源评估，如程清平等[4]基于SDGs与相关的美丽中国评价指标构建了黑河流域水资源承载力指标体系与评价模型，并从县域尺度对该流域水资源承载力进行了综合评估；周伟等[27]从水土资源对SDGs实现的贡献度层面，构建了西部水土资源发展可持续性评价的指标体系，选取评价方法，综合评估了西部水土资源。

塔里木河流域种植业的氮肥流失与畜牧业畜禽粪便的总氮排放所造成的地表和地下水质污染与可持续发展SDG6水环境与卫生目标相关联。农业灰水足迹强度所表示的农业污染压力以及农业灰水足迹效率所表示的农业生产发展程度都与SDG2可持续农业相关联。本文结合SDGs具体目标，根据农业灰水足迹及相关指标与SDG2、SDG6的关联性建立评价指标，如表1所示。本文涉及的农业灰水足迹指标并不是SDG2、SDG6实现的必要条件，而是对实现SDGs的贡献评估。

1.3 数据来源

耕地氮肥折纯施用量、畜禽数量、耕地面积、农业生产总值数据来源于2006—2020年的《新疆统计年鉴》和《新疆生产建设兵团统计年鉴》；畜禽粪便与尿液的排泄系数、畜禽粪便与尿液的全氮系数、畜禽粪便与尿液的流失率均来源于《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策》中的相关数据[28]。参照已有的研究成果[19,24-25]，将氮肥淋溶率 α 取值为10%；最大容许浓度 C_{max} 取值为0.01 $kg \cdot m^{-3}$；污染物受纳水体的自然本体浓度 C_{nat} 取值为0。

2 结果与分析

2.1 面向SDGs的塔里木河流域农业灰水足迹时空分布

2.1.1 农业灰水足迹的时序变化 自2006年来，塔里木河流域农业灰水足迹整体处于下降趋势（图1），流域内可持续发展中的水环境质量得到进一步改善，这主要得益于流域内氮肥以及畜牧养殖业中的总氮污排放量有所下降，减少了对流域内地下水环境的污染。

2006年塔里木河流域农业灰水足迹达到研究期内的最高 6.95×10^{10} m^3，畜牧业灰水足迹也达到最高 6.63×10^{10} m^3，占比95.4%。2017年塔里木河流域农业灰水足迹降至最低 3.96×10^{10} m^3，同时畜牧业灰

表1 面向SDGs的农业灰水足迹指标及属性

Tab. 1 Agricultural grey water footprint indicators and attributes for SDGs

指标	指标含义	对应SDGs目标	基于SDGs目标的可持续发展意蕴
种植业灰水足迹	种植业总氮排放所造成的地下水污染	水环境与卫生（SDG6）	稀释水体中种植业氮元素污染所需要的淡水体积，表示水体的污染程度
畜牧业灰水足迹	畜牧业总氮排放所造成的地下水污染	水环境与卫生（SDG6）	稀释水体中畜牧业氮元素污染所需要的淡水体积，表示水体的污染程度
农业灰水足迹	农业总氮排放所造成的地下水污染	水环境与卫生（SDG6）	稀释水体中农业氮元素污染所需要的淡水体积，表示水体的污染程度
农业灰水足迹强度	单位耕地面积污染量	可持续农业（SDG2）	农业面源污染压力
农业灰水足迹效率	农业生产发展程度	可持续农业（SDG2）	农业可持续发展水平

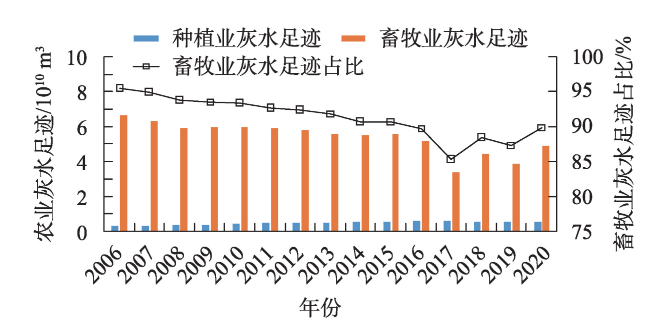


图1　塔里木河流域2006—2020年农业灰水足迹变化

Fig. 1　Change of agricultural grey water footprint in the Tarim River Basin from 2006 to 2020

水足迹也降至最低3.37×10^{10} m^3，占比85.10%。塔里木河流域种植业灰水足迹在2006—2016年处于缓慢上升的趋势，2016—2020年种植业灰水足迹处于缓慢下降的趋势，在0.32×10^{10} m^3～0.59×10^{10} m^{3}变化。畜牧业灰水足迹变化趋势与农业灰水足迹的变化趋势一致，在农业灰水足迹中其数值占比远高于种植业灰水足迹，说明塔里木河流域农业灰水足迹主要受畜牧业发展变化的影响。塔里木河流域农业灰水足迹从2006年开始呈现出逐年递减的趋势，在2017年降至最低，可能是由于从2006年开始牛、骆驼、马等粪便排泄系数较大的牲畜养殖数量逐年递减，直到2017年后其数量呈现出波动上升的趋势。同时2015年国务院为推进SDG6中的改善水质指标的实现，印发了水污染防治行动计划，新疆积极颁布自治区水污染防治工作方案，落实水环境质量改善要求，改善农业面源污染。因此，2016—2020年流域内农业水污染得到大幅改善。

塔里木河流域农业灰水足迹中畜牧业灰水足迹所占比例较高，年均占比达到91.3%，种植业灰水足迹所占比例较小，年均占比8.7%。由此可见，塔里木河流域的农业灰水足迹结构组成不合理，畜牧业是流域内农业灰水足迹的主要来源。可能由于近些年流域内畜牧业的快速发展，畜禽养殖总量相对较高，导致畜禽粪便污染排放较大。与此同时种植业灰水足迹占比有不断增加的趋势，主要是由于耕地面积以及氮肥施用量都有一定程度的增加。塔里木河流域内农业灰水足迹上升，下降波动变化取决于畜牧业养殖规模与结构变化。畜牧业总氮的排放是造成流域内水环境污染的主要原因。农业灰水足迹的降低有利于促进SDG6中的改善水质指标的实现。因此，塔里木河流域进行畜禽养殖污染防治，减少畜禽粪便总氮的污染排放是改善流域地表与地下水质以及推进流域实现SDG6目标的重要途径。

2.1.2　*农业灰水足迹空间格局变化*　我国在政策制度上不断加强对水资源、水环境的管理，2012年国务院颁布的《关于实行最严格水资源管理制度的意见》，分别确立了水资源开发利用控制，用水效率控制以及水功能区限制纳污“三条红线”。故本文以2012年为分界线，探讨塔里木河流域农业灰水足迹时空格局变化。

2006—2011年塔里木河流域年均农业灰水足迹为6.50×10^{10} m^3，其中贡献率最高的区域分别为喀什地区、和田地区和阿克苏地区，年均农业灰水足迹及占比分别为2.60×10^{10} m^3、1.25×10^{10} m^3、1.24×10^{10} m^{3}和40%、19.19%、19.03%（图2）。2012—2020年塔里木河流域年均农业灰水足迹为5.47×10^{10} m^3，相比于2006—2011年有所降低。其中，种植业灰水足迹增加了1.60×10^{9} m^3，畜牧业灰水足迹下降了

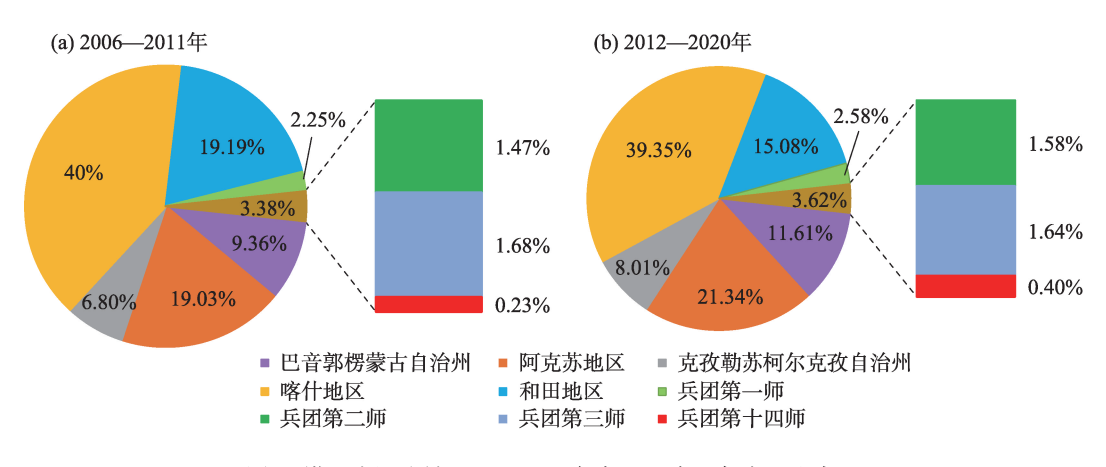


图2　塔里木河流域2006—2020年各地区农业灰水足迹占比

Fig. 2　The proportion of agricultural gray water footprint in Tarim River Basin from 2006 to 2020

1.19×10^{10} m³。特别是2012—2017年，农业灰水足迹下降幅度较大。

2012—2020年流域内灰水足迹贡献率最高的三个区域依然为喀什地区、阿克苏地区和和田地区，年均农业灰水足迹及占比分别为2.15×10^{10} m³、1.17×10^{10} m³、8.24×10^{9} m³和39.35%、21.34%、15.08%（图2）。喀什地区农业灰水足迹一直很高，对SDG6水和环境卫生实现的贡献率较低。主要是由于该地区氮肥施用量和畜牧养殖总量特别是粪便排泄量较大的牛、马等大牲畜的养殖数量远高于其他区域，喀什地区需要加强农业面源污染治理，合理调整畜禽养殖规模与结构，优先种植化肥施用量低与经济效益高的作物，推广测土配肥等提高化肥利用率。兵团第十四师农业灰水足迹占比最小，主要是由于其耕地面积、氮肥施用量都处于最小值以及畜牧养殖总量同比最小。

与2006—2011年相比，2012—2020年年均农业灰水足迹数值上升的区域为巴州与兵团第十四师，其余七个地区年均农业灰水足迹数值均处于下降状态。此外年均农业灰水足迹占比提高的地区分别为巴州、阿克苏地区、克州、兵团第一师、第二师和第十四师，说明这些区域对塔里木河流域农业面源污染的贡献度有所增加。

2006—2011年塔里木河流域年均畜牧业灰水足迹占农业灰水足迹的93.90%，喀什地区、和田地区和阿克苏地区超过年均畜牧业灰水足迹平均值；2012—2020年年均畜牧业灰水足迹占农业灰水足迹比例有所降低，为89.57%，喀什地区、和田地区、阿克苏地区和巴州超过年均畜牧业灰水足迹平均值，这主要是由于流域内畜牧业养殖结构的调整，2015年后该流域大牲畜养殖数量大幅度减少，使得畜牧业灰水足迹有所降低，改善了流域的农业面源污染。

2.2 面向SDGs的塔里木河流域农业灰水足迹强度变化

2.2.1 农业灰水足迹强度的时序分布 农业灰水足迹强度表明流域内单位耕地面积所拥有的污染量，其数值越大，表明种植业化肥总氮流失与畜牧业总氮排放量越大，流域内农业污染程度越高。2006—2020年塔里木河流域农业灰水足迹强度总体呈现下降趋势（图3）。由2006年的最高值4.48×10^{4} m³·hm⁻²下降至2017年的最低值1.68×10^{4} m³·hm⁻²，下降幅度为62.5%。2006—2020年塔里木河流域农业所

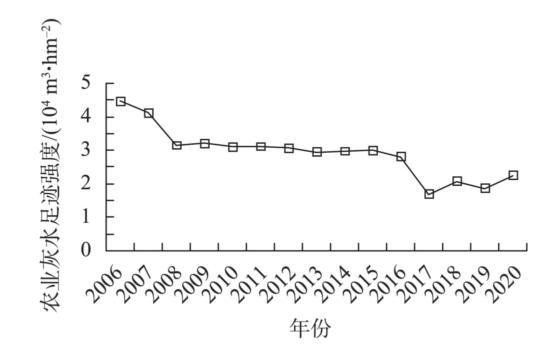


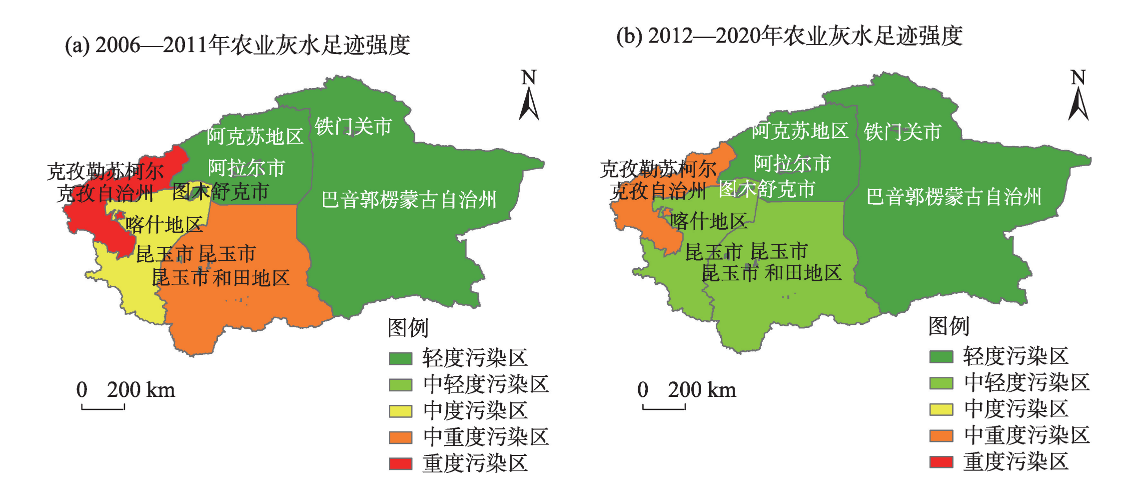
图3 塔里木河流域2006—2020年农业灰水足迹强度

Fig. 3 Strength of agricultural grey water footprint in the Tarim River Basin from 2006 to 2020

产生的面源污染有所下降，这主要得益于塔里木河流域畜牧养殖业结构的调整，流域畜牧养殖总量虽呈现出小幅度的波动上升，但粪便排泄量较大的马、驴、牛、骆驼等大牲畜的存栏数量由2006年的3.52×10^{6}头减少到2019年1.80×10^{6}头，下降了48.86%。而羊、猪等小牲畜存栏数上升数量较小，增幅仅为5.93%，对流域内畜牧业灰水足迹的整体变化趋势影响较小。种植业单位耕地面积氮肥折纯施用量在2006—2016年呈现上升趋势，2016—2020年呈现下降趋势，由2008年的198.23 kg·hm⁻²上升到2016年的288.73 kg·hm⁻²，上升幅度为31.34%，但由于种植业灰水足迹在塔里木河流域农业灰水足迹中所占比例远小于畜牧业灰水足迹，塔里木河流域农业灰水足迹依然呈现下降趋势。

为实现SDG2可持续农业发展目标，我国以《全国农业可持续发展规划（2015—2030年）》为基础展开可持续粮食生产体系的建设。新疆积极贯彻落实该规划，防治农田污染，综合治理养殖污染，逐步实现畜禽粪便生态消纳和达标排放。2016年后流域农业面源污染的大幅度下降，降低了塔里木河流域农业灰水足迹强度。

2.2.2 农业灰水足迹强度的空间格局变化 2006—2011年塔里木河流域农业灰水足迹强度平均值为3.53×10^{4} m³·hm⁻²，克州农业灰水足迹强度最高（1.05×10^{5} m³·hm⁻²），兵团第一师农业灰水足迹强度最低（9.39×10^{3} m³·hm⁻²）。按照2006—2011年塔里木河流域农业灰水足迹强度范围，将农业的面源污染程度划分为5个等级，分别为重度、中重度、中度、中轻度与轻度污染区（图4）。2006—2011年重度污染区为克州，中重度污染区为和田地区，中度污染区为喀什地区，轻度污染区为兵团第一师、第二师、



注:由于新疆生产建设兵团部分团场比较分散,在地图上以阿拉尔市、铁门关市、图木舒克市和昆玉市代表兵团第一、二、三和十四师。下同。

图4 塔里木河流域农业灰水足迹强度空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of agricultural grey water footprint intensity in the Tarim River Basin

第三师、第十四师、巴州和阿克苏地区。

2012—2020年塔里木河流域农业灰水足迹强度平均值为2.52×10^4 $m^3\cdot hm^{-2}$,相比2006—2011年下降了28.61%;克州农业灰水足迹强度依然最高(8.02×10^4 $m^3\cdot hm^{-2}$),相比于2006—2011年下降了23.62%;兵团第一师农业灰水足迹强度最低(8.10×10^4 $m^3\cdot hm^{-2}$),相比于2006—2011年下降了13.74%。根据上述划分区间,2012—2020年无重度污染区,克州降为中重度污染区,中轻度地区为喀什地区和和田地区,其余地区均为轻度污染区。与2006—2011年相比,2012年后,该流域农业面源污染整体有所降低,农业灰水足迹所导致的水污染有所减轻。克州由于耕地面积较小,而畜牧业灰水足迹相对较高,使得该地区农业灰水足迹强度一直呈现出最高值,对SDG2可持续农业实现的贡献度较低。

2.3 面向SDGs的塔里木河流域农业灰水足迹效率的时空分布

2.3.1 农业灰水足迹效率的时序分布 农业灰水足迹效率可反映出流域的农业发达程度,数值越大,流域农业生产发展程度越高,数值越小,流域农业生产发展程度越低。此外,农业灰水足迹效率可以间接反映流域内农业经济发展与地下水环境质量的协调发展程度。

塔里木河流域2006—2020年农业、种植业和畜牧业灰水足迹效率整体呈现出上升的趋势(图5)。2006年农业灰水足迹效率最低(0.6 元$\cdot m^{-3}$),2019年达到最高(4.03 元$\cdot m^{-3}$)。改革开放以来以及国家

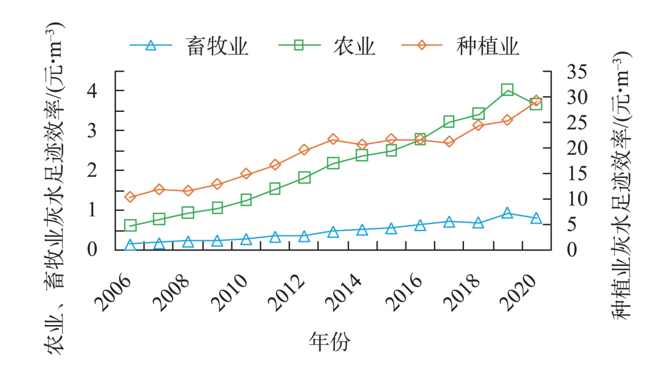


图5 塔里木河流域2006—2020年农业灰水足迹效率

Fig. 5 Agricultural grey water footprint efficiency in the Tarim River Basin from 2006 to 2020

实施西部大开发战略后,塔里木河流域农业发展得到了国家与自治区政策的大力扶持,农业生产得到有效发展,流域农业经济快速提升,在此期间塔里木河流域农业总产值稳步提升。此外,流域内化肥施用效率有所提升以及畜牧业养殖结构的改变,使得流域内农业灰水足迹效率逐步提升。

流域内种植业灰水足迹效率远高于畜牧业灰水足迹效率,种植业灰水足迹效率平均值达到18.88 元$\cdot m^{-3}$,而畜牧业灰水足迹效率平均值为0.46 元$\cdot m^{-3}$。种植业灰水足迹效率增长速度也高于畜牧业灰水足迹效率。2021年塔里木河流域种植业产值占流域农业总产值的70%以上,种植业是该流域农用地的传统耕作模式,同时受到自然条件的限制,种植业一直是流域农业发展中的主导产业。因此,流域内种植业灰水足迹效率整体较高。

在SDG2可持续农业实施的背景下,塔里木河

流域初步实现了从传统农业向可持续农业转型并形成生产、生活与生态协调发展初步互利共赢的局面。流域在研究期内农业灰水足迹处于下降的趋势,农业灰水足迹效率稳步提升。

2.3.2 *农业灰水足迹效率的空间格局变化* 2006—2011年塔里木河流域年均农业灰水足迹效率为1.02 元·m^{-3},兵团第一师农业灰水足迹效率最高(5.48 元·m^{-3}),克州最低(0.30 元·m^{-3})。巴州、阿克苏地区、兵团第一师、第二师、第三师和第十四师超过平均值,而克州、和田地区和喀什地区低于平均值。

2012—2020年塔里木河流域年均农业灰水足迹效率为2.89 元·m^{-3},兵团第一师农业灰水足迹效率依然最高(16.15 元·m^{-3}),克州依然为最低(0.81 元·m^{-3})。相比较于2006—2011年塔里木河流域农业灰水足迹效率有一定程度的提升,增长率高达183.33%,兵团第十四师增长率最大为287.97%,除了巴州的增长率为93.20%,其余地区增长率均超过100%,说明该流域内农业经济的整体发展速度加快。

以塔里木河流域年均农业灰水足迹效率的最高值与最低值作为参考区间,将农业灰水足迹效率划分为5种发达程度类型,分别为不发达区(0~3.3)、欠发达区(3.3~6.6)、一般发达区(6.6~9.9)、较发达区(9.9~13.2)和发达区(13.2~16.5)。2006—2011年流域内农业发展程度中,兵团第一师、第二师、第三师均为欠发达地区,第十四师、巴州、克州、喀什地区、阿克苏地区和和田地区均为不发达区。2012—2020年流域内农业生产发达程度整体有一定提升,兵团第一师为发达地区,第二师为较发达区,第三师与第十四师为一般发达区,巴州为欠发达区,克州、喀什地区、阿克苏地区和和田地区依然为不发达区(图6)。

3 讨 论

本研究发现塔里木河流域畜牧业所产生的畜禽粪便总氮排放是农业灰水足迹的主要来源。黄登迎等[29]研究发现新疆畜牧业灰水足迹对环境产生的污染压力是种植业的3倍。因此,探讨流域畜牧业灰水足迹变化,对流域水环境改善具有重要意义。流域内的畜禽养殖数量多,规模化养殖程度低,进而导致畜禽养殖粪便得不到无害化与资源化处理,是造成流域产生严重水资源污染的原因之一。此外,流域内的农区畜牧业的耦合发展较为缓慢,不利于实现畜禽粪便等农业废弃物的资源化利用,也是造成流域内水污染的另一个原因。赵俊等[30]研究发现塔里木河流域农牧耦合只是简单的初级耦合,畜牧业未能利用种植业发展的优势,不利于流域的传统农业向循环农业转型。

2000年后为促进流域农业经济的发展,以粮食为主的传统种植结构,逐渐发展为以棉、果等经济作物与粮食作物多元发展的种植结构。颜璐等[31]通过对塔里木河流域不同作物化肥施用量的时空变化分析,发现流域内不同种植结构的农作物产量对化肥施用的依赖度较高。在研究期内,随着经济作物的增加,为提高农作物产量,流域内氮肥施用

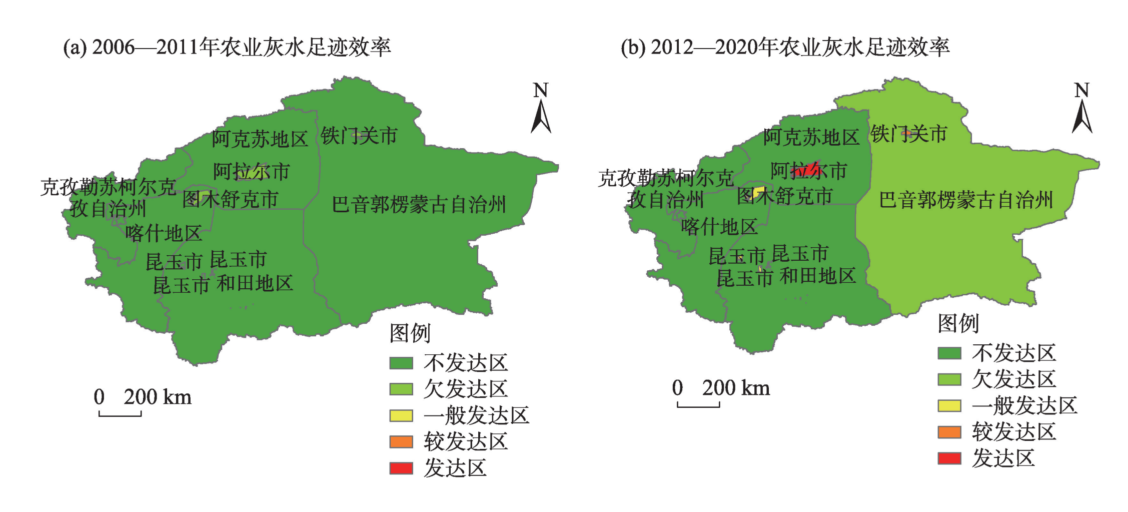


图6 塔里木河流域农业灰水足迹效率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of agricultural grey water footprint efficiency in the Tarim River Basin

量逐渐上升,虽促进了农业经济的发展,但也造成了严重的农业面源污染。

2016年后新疆为与国家的2030年可持续发展议程整体规划进行衔接,积极制定环保政策,在农业方面颁布有效防控种植业污染、着力解决畜牧业污染、农牧结合等措施促进农业的绿色可持续发展。2016年后流域内耕地面积有所增加,但氮肥的总施用量下降以及农业灰水足迹也大幅度下降,可能得益于农区畜牧业的发展,加强了种植业与畜牧业的联系,促进了种养平衡,实现了农业内部资源的循环以及通过实地调研与文献查阅可知[32],流域农户的有机肥使用率有所提升,减少了氮肥的施用。此外,随着农业科学技术的发展,氮肥施用的效率得到进一步提高。国家和自治区也加大了对畜牧业的投入,流域内畜禽养殖迈向规模化,畜禽粪便处理趋于标准化。种植业与畜牧业总氮排放量有所降低,改善了塔里木河流域内的生态水环境,促进了SDG6水环境与卫生和SDG2可持续农业的实现。

总体来看,塔里木河流域内的农业灰水足迹效率相对较高的地区主要集中在新疆生产建设兵团辖区。兵团持续推进农业现代化建设,其农业发展具有集约化程度高、规模化生产的特点。同时,兵团在植物育种、栽培、牲畜育种与饲养等技术引进与研发具有一定的领先性。兵团的种植业灰水足迹效率相对于流域内其他区域整体较高且畜牧业规模以及种植业面积相对于流域内其他地区较小。因此,兵团农业所产生的氮排放总量少,所导致的污染也相对较小。

4 结 论

(1) 塔里木河流域农业灰水足迹总体上呈现出下降的趋势,主要得益于畜牧业大牲畜养殖数量的下降。畜牧业灰水足迹占农业灰水足迹的比重为91.3%,种植业占比8.7%,流域农业灰水足迹以畜牧业为主。为实现SDGs目标,提高流域内水环境质量,实现农业的绿色可持续发展,应改善流域内畜牧业养殖规模、结构以及提高畜禽养殖粪便的资源化与循环化利用。深入推进农区农牧耦合发展,加大种植业与畜牧业的联系,形成循环农业、生态农业,促进农业废弃物资源化发展。

(2) 塔里木河流域农业灰水足迹效率逐步提升,2006年为最低(0.6元·m^{-3}),2019年达到峰值(4.03元·m^{-3}),说明在这期间流域内农业得到一定程度的发展。兵团第一师年均农业灰水足迹效率最高,克州一直最低。农业灰水足迹效率相对较高的区域主要集中在兵团第一师、第二师、第三师和第十四师。流域内种植业灰水足迹效率远高于畜牧业灰水足迹效率,应积极落实高标准农田建设、土地开发整理等标准,促进种植业的规模化发展,减少化肥施用量,提高农作物产量,改善生态环境;继续加深调整畜牧养殖业结构,减少大牲畜的养殖,增加经济效益较高的小型牲畜以及家禽的养殖,改良牲畜品种,延长畜产品加工产业链,提高畜牧业总体产值,促进农业经济与环境的协调发展。

(3) 塔里木河流域农业灰水足迹强度虽有一定改善,但流域内农业灰水足迹强度与效率存在着明显的空间差异性。克州、喀什地区、和田地区农业灰水足迹相对较高,农业灰水足迹效率远低于流域内平均值,应提高重视程度,因地制宜地发展与优化农业生产布局。

参考文献(References):

[1] 周全, 董战峰, 吴语晗, 等. 中国实现2030年可持续发展目标进程分析与对策[J]. 中国环境管理, 2019, 11(1): 23–28. [Zhou Quan, Dong Zhanfeng, Wu Yuhan, et al. The status and countermeasures for China's achievement of the 2030 sustainable development goals[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(1): 23–28.]

[2] John Maurice. UN set to change the world with new development goals[J]. The Lancet, 2015, 386: 1121–1124.

[3] 朱婧, 孙新章, 付宏鹏. 可持续发展目标(SDGs)理论与实践研究[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2019. [Zhu Jing, Sun Xinzhang, Fu Hongpeng. Research on Theory and Practice of Sustainable Development Goals (SDGs) [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2019.]

[4] 程清平, 钟方雷, 左小安, 等. 美丽中国与联合国可持续发展目标(SDGs)结合的黑河流域水资源承载力评价[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 204– 214. [Cheng Qingping, Zhong Fanglei, Zuo Xiao'an, et al. Evaluationof water resources carrying capacity of Heihe River Basin combining beautiful China with SDGs[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 204–214.]

[5] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources[J]. Water Encyclopedia, 2008, 43(2): 147.

[6] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan, 2011: 30–40.

[7] CHapagain A K, HOekstra A Y, Savenije H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources

in the cotton producing countries[J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186-203.

[8] 傅春, 陈毓迪, 刘业忠, 等. 江西省农田灰水足迹时空分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1501-1508. [Fu Chun, Chen Yudi, Liu Yezhong, et al. Temporal and spatial analysis of grey water footprint in Jiangxi Province farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(7): 1501-1508.]

[9] 孙诗阶, 许朗, 陈杰. 农业灰水足迹与农业经济增长的脱钩关系研究——基于长江经济带11省市的实证分析[J]. 节水灌溉, 2022, 322(6): 17-23. [Sun Shijie, Xu Lang, Chen Jie. A study on the decoupling relationship between agricultural grey water footprint and agricultural economic growth: Based on the empirical analysis of 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Belt[J]. Water Saving Irrigation, 2022, 322(6): 17-23.]

[10] 吴兆磊, 吴兆丹, 祖晓倩. 基于灰水足迹视角的浙江省工业出口结构优化研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 40-45. [Wu Zhaolei, Wu Zhaodan, Zu Xiaoqian. Optimization of industrial export structure in Zhejiang Province in the perspective of grey water footprint[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 40-45.]

[11] 班荣舶, 张磊, 曹跃杰. 基于灰水足迹的安顺市工业经济增长与水环境协调关系分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6): 120-123. [Ban Rongbo, Zhang Lei, Cao Yuejie. Analysis of cooperative development between water environment and industrial economy growth in Anshun City based on grey water foot-print[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(6): 120-123.]

[12] 李啸虎, 杨德刚. 水足迹视角下干旱区城市工业结构优化研究——以乌鲁木齐市为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 170-176. [Li Xiaohu, Yang Degang. Structure optimization of urban industy in arid land based on water footprint: A case study of Urumqi[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 170-176.]

[13] Andreea E, Teodosiu C. Grey water footprint assessment and challenges for its implementation[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2011, 10(3): 333-340.

[14] 洪传春, 刘某承, 张雅静, 等. 时空视角下京津冀农业灰水足迹强度与效率分析[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(2): 128-135. [Hong Chuanchun, Liu Moucheng, Zhang Yajing, et al. Analysis on the intensity and efficiency of agricultural grey water footprint in Beijing-Tianjin-Hebei Region under the perspective of spatial-temporal patten[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021, 44(2): 128-135.]

[15] 张鑫, 李磊, 甄志磊, 等. 时空与效率视角下汾河流域农业灰水足迹分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1502-1510. [Zhang Xin, Li Lei, Zhen Zhilei, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Fenhe River Basin based on the perspective of space-time and efficiency[J]. China Environmental Science, 2019, 39(4): 1502-1510.]

[16] 班荣舶, 何太蓉. 重庆种植业灰水足迹核算及空间差异分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(11): 7-13. [Ban Rongbo, He Tairong. Calculation and space difference analysis on grey water footprint for crop farming in Chongqing[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(11): 7-13.]

[17] 何立新, 练继建, 王书吉. 河北省主要农作物2005—2014年灰水足迹变化[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 143-148. [He Lixin, Lian Jijian, Wang Shuji. Variation of grey water footprint of main crops in Hebei Province from 2005 to 2014[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12): 143-148.]

[18] 姜旭海, 韩玲, 李帆. 陕西省主要作物灰水足迹时空变化特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 210-215. [Jiang Xuhai, Han Ling, Li Fan. Study on temporal and spatial changes of grey water footprints of main crops in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 210-215.]

[19] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 新疆主要农作物生产水足迹计算分析[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 195-200, 235. [Xuan Junwei, Zheng Jianghua, Liu Zhihui. Calculation and analysis on water footprint of main crops in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 195-200, 235.]

[20] 尹明财, 朱豪, 胡圆昭, 等. 甘肃省灰水足迹变化特征及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1810-1818. [Yin Mingcai, Zhu Hao, Hu Yuanzhao, et al. Analysis of various characteristics and driving factors of gray water footprint in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1810-1818.]

[21] 王圣云, 林玉娟. 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素——水足迹与灰水足迹视角[J]. 地理科学, 2021, 41(2): 290-301. [Wang Shengyun, Lin Yujuan. Spatial evolution and its drivers of regional agro-ecological efficiency in China's from the perspective of water footprint and gray water footprint[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(2): 290-301.]

[22] 李东林, 左其亭, 张伟, 等. 基于Nerlove方法的塔里木河流域农业水资源配置模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 75-80. [Li Donglin, Zuo Qiting, Zhang Wei, et al. Agricultural water resources allocation model in Tarim River Basin based on Nerlove approach[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 75-80.]

[23] 韩琴, 孙才志, 邹玮. 1998—2012年中国省际灰水足迹效率测度与驱动模式分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1179-1191. [Han Qin, Sun Caizhi, Zou Wei. Grey water footprint efficiency measure and its driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998 to 2012[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1179-1191.]

[24] 黄秀艳, 师庆东. 新疆于田绿洲2015年农业景观要素水足迹计算[J]. 节水灌溉, 2018, 274(6): 111-115. [Huang Xiuyan, Shi Qingdong. Calculation of water footprint of agricultural landscape elements in Yutian Oasis of Xinjiang in 2015[J]. Water Saving Irrigation, 2018, 274(6): 111-115.]

[25] 李啸虎, 杨德刚. 基于水足迹的节水型城郊种植业结构优化研究——以乌鲁木齐市为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 298-304. [Li Xiaohu, Yang Degang. Study of the structure optimization of water saving suburban cropping in arid lands based on the water footprint: A case study in Urumqi City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 298-304.]

[26] 虞祎, 张晖, 胡浩. 农业生产与水资源承载力评价[J]. 中国生态

农业学报, 2016, 24(7): 978−986. [Yu Yi, Zhang Hui, Hu Hao. Agricultural production and evaluation in terms of water resources carrying capacity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(7): 978−986.]

[27] 周伟, 沈镭, 钟帅. 面向可持续发展目标的西部水土资源评估[J]. 地理研究, 2022, 41(3): 917−930. [Zhou Wei, Shen Lei, Zhong Shuai. Assessment of land and water resources in western China for the sustainable development goals[J]. Geographical Research, 2022, 41(3): 917−930.]

[28] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [Department of Natural Ecology Protection, State Environmental Protection Administration. Investigation on the Pollution Situation of National Large-scale Livestock and Poultry Breeding Industry and Countermeasures for Prevention and Control[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.]

[29] 黄登迎, 杨红. 新疆畜牧业发展用水研究——基于水足迹的视角[J]. 节水灌溉, 2018, 272(4): 96−98, 104. [Huang Dengying, Yang Hong. A study on water use of Xinjiang animal husbandry development from the perspective of water footprint[J]. Water Saving Irrigation, 2018, 272(4): 96−98, 104.]

[30] 赵俊, 刘新平, 刘向晖, 等. 塔里木河流域农牧系统耦合协调度分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(5): 1077−1084. [Zhao Jun, Liu Xinping, Liu Xianghui, et al. Analysis on coupling coordination degree between agriculture and animal husbandry systems in Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(5): 1077−1084.]

[31] 颜璐, 马惠兰. 塔里木河流域不同作物化肥施用时空变化及贡献率分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 587−595. [Yan Lu, Ma Huilan. Contribution rate and change of fertilizer input in different planting structures in Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(3): 587−595.]

[32] 张丽丽, 邓晓雅, 龙爱华, 等. 基于农业水足迹的水资源安全时空变化分析——以新疆和田地区为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 436−447. [Zhang Lili, Deng Xiaoya, Long Aihua, et al. Spatial-temporal assessment of water resource security based on the agricultural water footprint: A case in the Hotan Prefecture of Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 436−447.]

Agricultural gray water footprint in the Tarim River Basin using SDGs analysise

DU Huijuan[1], WANG Guangyao[1,2,3], RAN Guangyan[1], LYU Mi[1]

(1. College of Sciences, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Border Development and Security Governance Research Institute, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: The dry Tarim River Basin in Northwest China acts as a crucial ecotone for Xinjiang's agricultural and grazing resources. Therefore, studying agricultural nonpoint source pollution is essential for the green and sustainable growth of basin agriculture. This research offers a gray water footprint theory-based assessment index for China's sustainable development. Furthermore, the Tarim River Basin's regional and temporal variation patterns are examined using SDGs framework. The agricultural gray water footprint's intensity and efficiencies are estimated for 2006−2020. The findings are shown as below. (1) The Tarim River Basin's entire agricultural gray water footprint has reduced, falling from 6.95×10^{10} m^3 in 2006 (highest value) to 3.96×10^{10} m^3 in 2017 (lowest value). The main source of the gray water footprint is animal husbandry. (2) In the Tarim River Basin, the intensity of the agricultural gray water footprint has decreased by 62.5% from 4.48×10^4 $m^3\cdot hm^{-2}$ in 2006 to 1.68×10^4 $m^3\cdot hm^{-2}$ in 2017. (3) The Tarim River Basin's agricultural gray water footprint efficiency has increased from 0.6 $yuan\cdot m^{-3}$ in 2006 to 4.03 $yuan\cdot m^{-3}$ in 2019. To sum up, initiatives to improve the water environment in the Tarim River Basin should emphasize encouraging the integrated development of agriculture and animal husbandry in agricultural areas, modifying the livestock and poultry breeding structure and putting livestock and poultry manure recycling into practice.

Keywords: agricultural grey water footprint; agricultural grey water footprint intensity; agricultural grey water footprint efficiency; sustainable development goal; Tarim River Basin